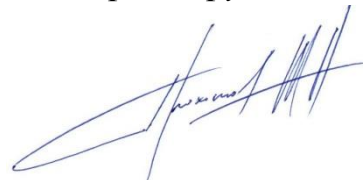


На правах рукописи



Грохотов Михаил Андреевич

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКОРОСТИ
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ПЛАМЕНИ ПРИ СГОРАНИИ
ГАЗОВОЗДУШНОГО ОБЛАКА В ОТКРЫТОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

Специальность: 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность
(технические науки, нефтегазовая отрасль)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре процессов горения (в составе учебно-научного комплекса процессов горения и экологической безопасности) Академии Государственной противопожарной службы МЧС России

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Бегишев Ильдар Рафатович

Официальные оппоненты:

Шебеко Юрий Николаевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБУ ВНИИПО МЧС России,
главный научный сотрудник
научно-исследовательского центра
нормативно технических
проблем пожарной безопасности

Васюков Глеб Викторович
кандидат технических наук, доцент,
ОАО «Институт Гипростроймост»,
главный специалист

Ведущая организация:

ФГБУ "Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России" (федеральный центр науки и высоких технологий)

Защита диссертации состоится «18» декабря 2018 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 205.002.02 в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:

<https://academygps.ru/upload/iblock/6b1/6b17d412792b738b7e55e3e5a485849a.pdf>

Автореферат разослан «19» октября 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Сивенков Андрей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На территории объектов нефтегазовой отрасли в результате разгерметизации (разрушения) технологического оборудования или трубопроводов возможно образование больших объёмов горючих газозвдушных смесей (ГВС), воспламенение которых может привести к пожарам, взрывам и разрушениям зданий (сооружений). Согласно статистики Ростехнадзора на рассматриваемых объектах ежегодно происходит до 10 инцидентов, связанных со взрывами ГВС как в замкнутых объёмах, так и в открытом пространстве. Одним из характерных примеров взрыва ГВС в открытом пространстве является инцидент, произошедший в 2014 г. на ОАО «Ачинский НПЗ Восточная нефтяная компания». В результате взрыва ГВС на территории объекта площадью около 300 тыс. м² были полностью разрушены до 30 % производственных зданий и сооружений, а остальные – сильно повреждены. При этом 32 человека получили травмы различной степени тяжести, из них 8 – смертельные.

В соответствии с требованиями ст. 6 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» одним из условий соответствия объекта защиты требованиям пожарной безопасности является выполнение в полном объёме требований пожарной безопасности, установленных техническими регламентами, и пожарный риск не должен превышать допустимых значений. Оценка пожарного риска проводится в настоящее время по «Методике определения расчётных величин пожарного риска на производственных объектах» (утверждена приказом МЧС России № 404 от 10.07.2009 г.), содержащей в том числе, метод количественной оценки параметров волны давления при сгорании газозвдушного облака. На численные значения параметров взрывной волны основное влияние оказывает скорость распространения фронта пламени (СРФП). Трудность в определении СРФП заключается в том, что она меняется в процессе распространения, зависит от газодинамических процессов и определяется особенностями кинетики химической реакции. При этом расчеты СРФП, выполненные как по указанному выше методу, так и по «Методике оценки последствий аварийных взрывов топливно-звдушных смесей» (утверждена приказом Ростехнадзора № 137 от 31.06.2016 г.), «Методике определения параметров волны сжатия внешних дефлаграционных взрывов» (разработана НТЦ «Взрывоустойчивость», 1998 г.), а также по методике, предложенной профессором В.И. Макеевым, показали, что полученные значения СРФП существенно различаются между собой.

Таким образом, развитие методики определения СРФП при сгорании ГВС в открытом пространстве позволит точнее прогнозировать последствия аварийных взрывов и, как следствие, предусматривать необходимые мероприятия противопожарной защиты, которые, в свою очередь, должны быть учтены при определении расчётных величин пожарного риска.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами процесса сгорания ГВС и определением СРФП занимались как отечественные

(Д.А. Франк-Каменецкий, Н.Н. Семёнов, Я.Б. Зельдович, А.С. Компанеец, К.И. Щёлкин, В.И. Макеев, Ю.Н. Шебеко, А.В. Мишуев, Д.З. Хуснутдинов, А.А. Комаров, В.А. Горев и др.), так и зарубежные учёные (G. Damkohler, D.T. Williams, L.M. Bollinger, B. Lewis, V.C. Marshall, G. Von Elbe, R.G. Abdel-Gayed, D. Bradley, D. Lee, K.Y. Huh et. all).

Однако, несмотря на значительные достижения в этой области исследований, до настоящего времени отсутствует единое мнение в выборе методики для определения СРФП при сгорании ГВС в открытом пространстве.

Цель работы: совершенствование методики прогнозирования СРФП при сгорании газовоздушного облака в открытом пространстве.

В соответствии с целью были сформулированы следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ существующих методик определения параметров взрыва ГВС в открытом пространстве и выявить их отличительные особенности;

2. Разработать математическую модель фототеплового воспламенения, необходимую для расчёта показателей пожаровзрывоопасности газовых смесей, основанную на законах химической кинетики и термодинамики;

3. Теоретически обосновать расчёт СРФП при сгорании ГВС, учитывающую физико-химические и газодинамические свойства горючей среды;

4. Провести верификацию усовершенствованной методики прогнозирования СРФП на основе сравнительного анализа результатов расчёта с последствиями реальных аварийных взрывов.

Объект исследования – процесс сгорания ГВС, образовавшейся при аварийных выбросах горючих газов из технологического оборудования или трубопроводов в открытом пространстве.

Предмет исследования – определение СРФП при сгорании ГВС.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель фототеплового воспламенения, позволяющая рассчитывать показатели пожаровзрывоопасности горючих газовых смесей, которая учитывает химическую кинетику и термодинамику процесса;

- получена теоретически обоснованная формула для расчёта СРФП при сгорании ГВС;

- экспериментально установлена динамика изменения СРФП для пропановоздушной смеси стехиометрического состава в зависимости от расположения источника зажигания и условий расширения сгорающей ГВС.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанная математическая модель фототеплового воспламенения, базирующаяся на кинетике химического взаимодействия и тепловой теории распространения пламени, является универсальной и может быть использована для определения показателей пожаровзрывоопасности любых газовых смесей с известными кинетическими параметрами и теплофизическими свойствами.

Формула для расчёта СРФП, полученная теоретически с учётом физико-химических и газодинамических свойств газовой среды, может применяться

для прогнозирования последствий аварийных выбросов горючих газов в открытом пространстве, в том числе, при оценке пожарных рисков.

Методология и методы исследования. Основу теоретических исследований составляли методы математического моделирования и физического подобия, физический эксперимент, теория ошибок, сравнение, описание. Результаты численных расчётов подтверждены результатами экспериментальных исследований, в том числе, выполненных другими авторами.

Информационной основой исследования являлись отечественные и зарубежные литературные источники, нормативные документы, а также материалы расследований аварийных взрывов на объектах нефтегазовой отрасли.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель фототеплового воспламенения, позволяющая определять показатели пожаровзрывоопасности газовых смесей;
- теоретически обоснованная формула для прогнозирования СРФП при сгорании ГВС в открытом пространстве;
- результаты верификации методики прогнозирования СРФП на основе сравнительного анализа результатов расчётов с последствиями реальных аварийных взрывов.

Степень достоверности полученных результатов и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается: обоснованностью выбора параметров и критериев, позволяющих сравнивать теоретические и экспериментальные данные; экспериментальные исследования выполнялись с применением измерительного оборудования, прошедшего поверку и откалиброванного для соответствующих условий; внутренней непротиворечивостью результатов и их согласованностью с результатами экспериментов и данными других авторов.

Материалы диссертации реализованы:

- при разработке свода правил СП 231.1311500.2015 Обустройство нефтяных и газовых месторождений. Требования пожарной безопасности. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2018 г.;
- при определении пожаровзрывобезопасного режима работы реактора хлорирования метана на предприятии ООО «ГалоПолимер Кирово-Чепецк». Кирово-Чепецк: ООО «ГалоПолимер Кирово-Чепецк», 2018 г.;
- при расчёте безопасных расстояний от оборудования оптоволоконной системы мониторинга трубопроводов (ОСМТ) «Омега» до трубопроводов и технологического оборудования, где при авариях возможно образование горючих ГВС. М.: АО «ОМЕГА», 2018 г.;
- при разработке лекций и проведении практических и семинарских занятий по дисциплине «Теория горения и взрыва». М.: Академия ГПС МЧС России, 2018 г.

Основные результаты работы доложены на: 5-й Международной научно-практической конференции «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2016); XIX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов,

аспирантов и молодых учёных «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (г. Москва, НИУ МГСУ, 2016); 25-й Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2016» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2016); VI Международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2017» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2017); XXIX Международной научно-практической конференции: «Горение и проблемы тушения пожаров». (г. Балашиха, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2017); 26-й Международной научно-технической конференции «Системы безопасности – 2017» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2017); 6-й Международной научно-практической конференции «Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации» (г. Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ.

Структура, объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и трёх приложений. Содержание работы изложено на 140 страницах текста, включает в себя 21 таблицу, 47 рисунков, список литературы из 96 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель, задачи, объект и предмет исследования. Показана научная новизна работы, её теоретическая и практическая значимость. Представлены положения, выносимые на защиту, и сведения о внедрении и апробации результатов работы.

В первой главе «Анализ методик оценки зон воздействия поражающих факторов при внешних взрывах газовоздушных смесей на пожаровзрывоопасных объектах» выполнен анализ существующих методик оценки последствий аварийных взрывов ГВС. Установлено, что существует две группы методик, соответственно основанных на:

- энергопотенциале смеси, участвующей во взрыве;
- расчёте параметров волн сжатия от сферы, расширяющейся во времени, математически описывающий дефлаграционный взрыв ГВС.

Первая группа методик базируется на моделировании ударных волн (скорость распространения пламени превышает скорость звука в газе), образующихся при взрыве конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). Данный принцип теоретически обоснован и экспериментально подтверждён для воздушных ударных волн, возникающих при взрывах ВВ и детонационных взрывах ГВС. Основным показателем, характеризующим параметры ударной волны, определяется через энергопотенциал смеси. Вторая группа методик, как видно из названия, моделирует дефлаграционный взрыв, в котором скорость распространения пламени существенно меньше (дозвуковая), в силу чего основное воздействие создаёт волна сжатия. В данных методиках основным фактором, влияющим на численные значения параметров волны сжатия, является СРФП.

Анализ произошедших взрывов ГВС на объектах нефтегазовой отрасли показал, что, как правило, реализуется дефлаграционный взрыв. Поэтому основное внимание было уделено методам оценки СРФП, содержащихся в: «Методике оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» (утверждена приказом Ростехнадзора № 137 от 31.03.2016 г., далее – Методика Ростехнадзора); «Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (утверждена приказом МЧС России № 404 от 10.06.2009 г., далее – Методика МЧС); «Методике определения параметров волны сжатия внешних дефлаграционных взрывов» (разработана НТЦ «Взрывоустойчивость», 1998 г., далее – Методика Д.З. Хуснутдинова); методике профессора В.И. Макеева.

В результате анализа значений основных параметров взрыва (избыточное давление и импульс фазы сжатия), полученных по рассматриваемым методикам установлено, что они дают схожие результаты при одинаковой СРФП. Основное различие заключается в методе определения СРФП. Для одного и того же сценария взрыва ГВС методы определения СРФП дают существенно разные значения, что влияет на значения параметров взрыва. Таким образом, для корректного расчёта параметров воздушных волн давления при сгорании ГВС, необходимо исследовать вопрос о методе определения СРФП.

Во второй главе «Модель фототеплового воспламенения для расчёта показателей пожаровзрывоопасности газовых смесей» представлена математическая модель фототеплового воспламенения, позволяющая определять показатели пожаровзрывоопасности газовых смесей. Например, при расчёте параметров взрыва необходимо знать массу горючей компоненты, которая лежит во взрывоопасных пределах, то есть между нижним и верхним концентрационными пределами распространения пламени.

Анализ существующих расчётных формул и моделей для определения показателей пожаровзрывоопасности газовых смесей показал, что они дают удовлетворительный результат для веществ одного гомологического ряда или близких по строению молекул веществ и неприменимы для многокомпонентных смесей, где вещества могут вступать между собой в химическую реакцию.

В связи с этим была разработана модель фототеплового воспламенения, в которой учитывается физико-химическая кинетика протекающей реакции. Для определения скорости химической реакции и последующего определения скорости тепловыделения рассматривались стадии элементарных химических реакций. Источник воспламенения в модели заложен в виде тепла и/или ультрафиолетового излучения (УФ-излучение). Изменение температуры в смеси во времени описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + \frac{q(1 - \eta)}{c\rho}, \quad (1)$$

где T – термодинамическая температура; τ – время; λ , c , ρ – соответственно коэффициент теплопроводности, молярная теплоёмкость и плотность реакционной смеси; η – коэффициент теплопотерь; x , r – координаты точки в цилиндри-

ческом реакционном сосуде; $q = \sum W_i Q_i$ – скорость тепловыделения; W_i , Q_i – скорость и тепловой эффект каждой стадии химической реакции.

При решении уравнения теплопроводности значения коэффициентов теплопроводности и теплоёмкости рассчитывали для исходного состава смеси, а в ходе химического превращения, учитывали их изменение только от температуры.

Модель апробирована на воспламенении газовых смесей метана, хлорметана и дихлорметана с хлором. Исходная смесь может содержать как один, так и несколько горючих и негорючих компонентов. В таблице 1 приведены элементарные реакции, происходящие в этих смесях.

Таблица 1 – Элементарные реакции хлорирования метана

Элементарные реакции	
$Cl_2 \xrightarrow{h\nu, T} 2Cl$	– зарождение цепей
$CH_4 + Cl \rightarrow CH_3 + HCl$ $CH_3 + Cl_2 \rightarrow CH_3Cl + Cl$ $CH_3Cl + Cl \rightarrow CH_2Cl + HCl$ $CH_2Cl + Cl_2 \rightarrow CH_2Cl_2 + Cl$ $CH_2Cl_2 + Cl \rightarrow CHCl_2 + HCl$ $CHCl_2 + Cl_2 \rightarrow CHCl_3 + Cl$ $CHCl_3 + Cl \rightarrow CCl_3 + HCl$ $CCl_3 + Cl_2 \rightarrow CCl_4 + Cl$	– продолжение цепей
$CH_3 + Cl \rightarrow CH_3Cl$ $CH_2Cl + Cl \rightarrow CH_2Cl_2$ $CHCl_2 + Cl \rightarrow CHCl_3$ $CCl_3 + Cl \rightarrow CCl_4$ $Cl + Cl + M \rightarrow Cl_2 + M^*$	– обрыв цепей

Решая уравнение теплопроводности в системе *MATLAB* численным методом с применением явной конечно-разностной схемы, получали зависимости температуры горючей смеси от времени в любой точке исследуемой системы (рисунок 1), а также температурные поля (рисунок 2 а, б, в).

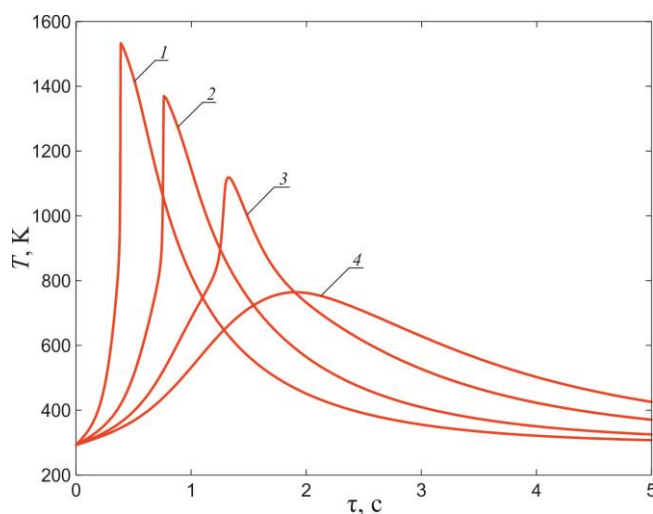


Рисунок 1 – Изменение температуры в смеси $0,2CH_4 + 0,8Cl_2$ при интенсивности УФ-излучения:
1 – I_0 ; 2 – $0,3I_0$; 3 – $0,15I_0$; 4 – $0,1I_0$

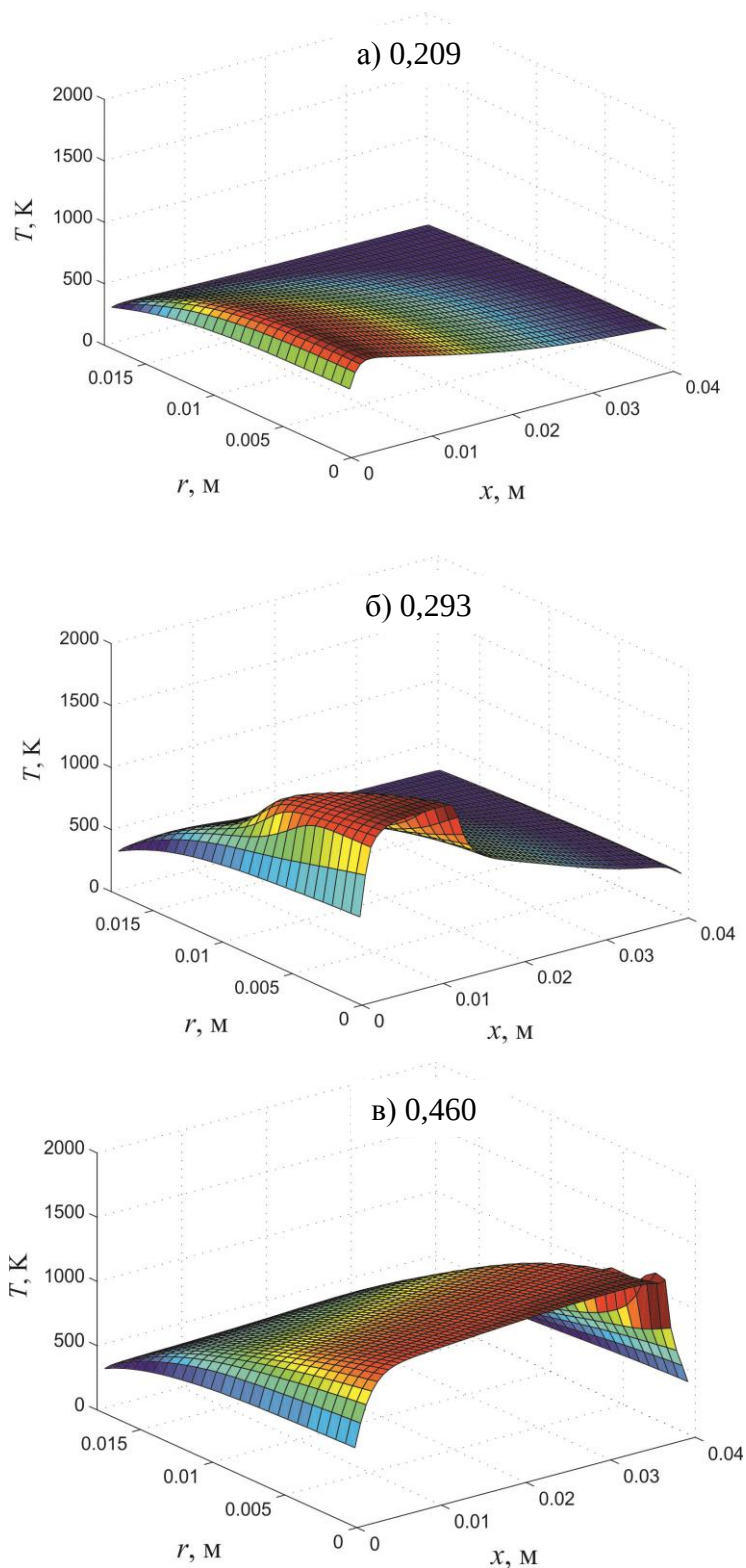


Рисунок 2 – Температурное поле в смеси $0,35\text{CH}_4 + 0,65\text{Cl}_2$ на различные моменты времени от начала облучения УФ-излучением максимальной интенсивности $I_0 = 2 \cdot 10^{21}$ квант/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)

Изменяя исходные условия (начальную температуру, интенсивность излучения, концентрации компонентов исходной горючей смеси), устанавливали предельные параметры воспламенения, которые, по сути, и являются показателями пожаровзрывоопасности исследуемых горючих смесей.

Параллельно с этим проводили экспериментальные исследования и сравнивали результаты расчёта и эксперимента. На рисунке 3 показаны расчётные зависимости максимальной температуры разогрева горючей газовой смеси от концентрации горючего.

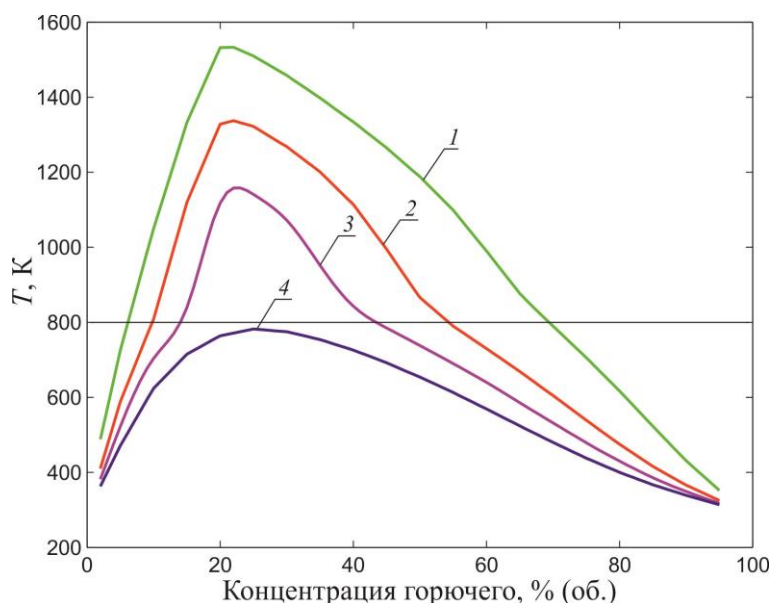


Рисунок 3 – Расчётные зависимости максимальной температуры разогрева смеси от начального содержания метана при различных интенсивностях УФ-излучения:
 $1 - I = I_0$; $2 - I = 0,25I_0$; $3 - I = 0,15I_0$; $4 - I = 0,1I_0$

По этим зависимостям находили концентрационную область воспламенения (рисунок 4). Здесь же приведена и экспериментально установленная концентрационная область воспламенения.

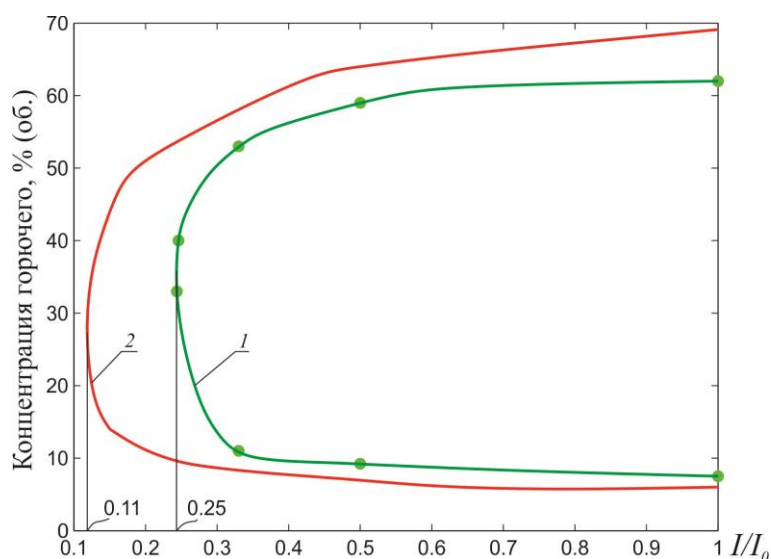


Рисунок 4 – Зависимости концентрационных пределов фототеплового воспламенения смеси $\text{CH}_4 + \text{Cl}_2$ от интенсивности УФ-излучения:
 1 – экспериментальная; 2 – расчётная

Аналогичные расчёты проводились для хлорметана и дихлорметана. Установленные предельные параметры (концентрационные пределы, критическая интенсивность УФ-излучения) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Предельные параметры воспламенения газовых смесей с хлором

Предельные параметры	Метан		Хлорметан		Дихлорметан	
	Расчёт	Эксперимент	Расчёт	Эксперимент*	Расчёт	Эксперимент*
КПВ, %(об.)	6,0–69,0	7,5–62,0	9,0–73,0	9,0–68,0	21,0–54,0	17,0–53,0
$I_{кр} / I_0$	$0,11I_0$	$0,25I_0$	$0,025I_0$	$0,047I_0$	$0,33I_0$	$0,25I_0$

* – экспериментальные значения для хлорметана и дихлорметана, установленные И.С. Никитиным и П.В. Комраковым.

Как видно из таблицы 2, в целом, расчётные и экспериментальные значения лучше согласуются по концентрационным пределам, хуже – по критическим значениям интенсивности УФ-излучения.

Вводя в исходную горючую смесь негорючий компонент и меняя его концентрацию можно рассчитывать значения минимальной флегматизирующей концентрации (МФК). На рисунке 5 показаны расчётные зависимости концентрационных пределов воспламенения смеси хлора с хлорметаном от концентрации хлороформа и четырёххлористого углерода.

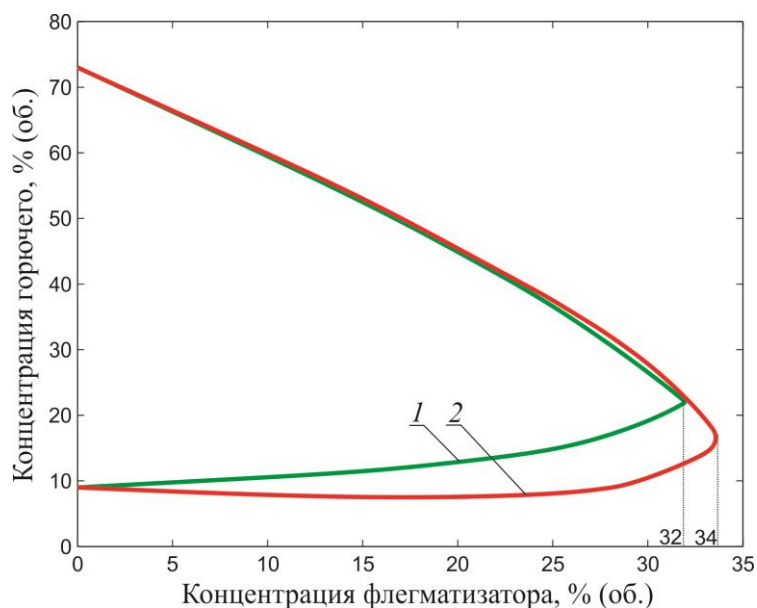


Рисунок 5 – Расчётные зависимости концентрационной области фотовоспламенения смеси $\text{CH}_3\text{Cl} + \text{Cl}_2$ от концентрации флегматизатора:
1 – четырёххлористый углерод; 2 – хлороформ

МФК для хлороформа составило 34 %(об.), а для четырёххлористого углерода 32 %(об.). Экспериментально установленные значения – 29 и 34 %(об.), соответственно.

Удовлетворительные расчётные результаты получены при определении температуры самовоспламенения. В этом случае рассматривали только тепловое инициирование воспламенения горючей смеси. Изменяя температуру стенок реакционного сосуда определяли температуру, при которой происходит

воспламенение смеси. На рисунке 6 показаны температурные поля на различные моменты времени.

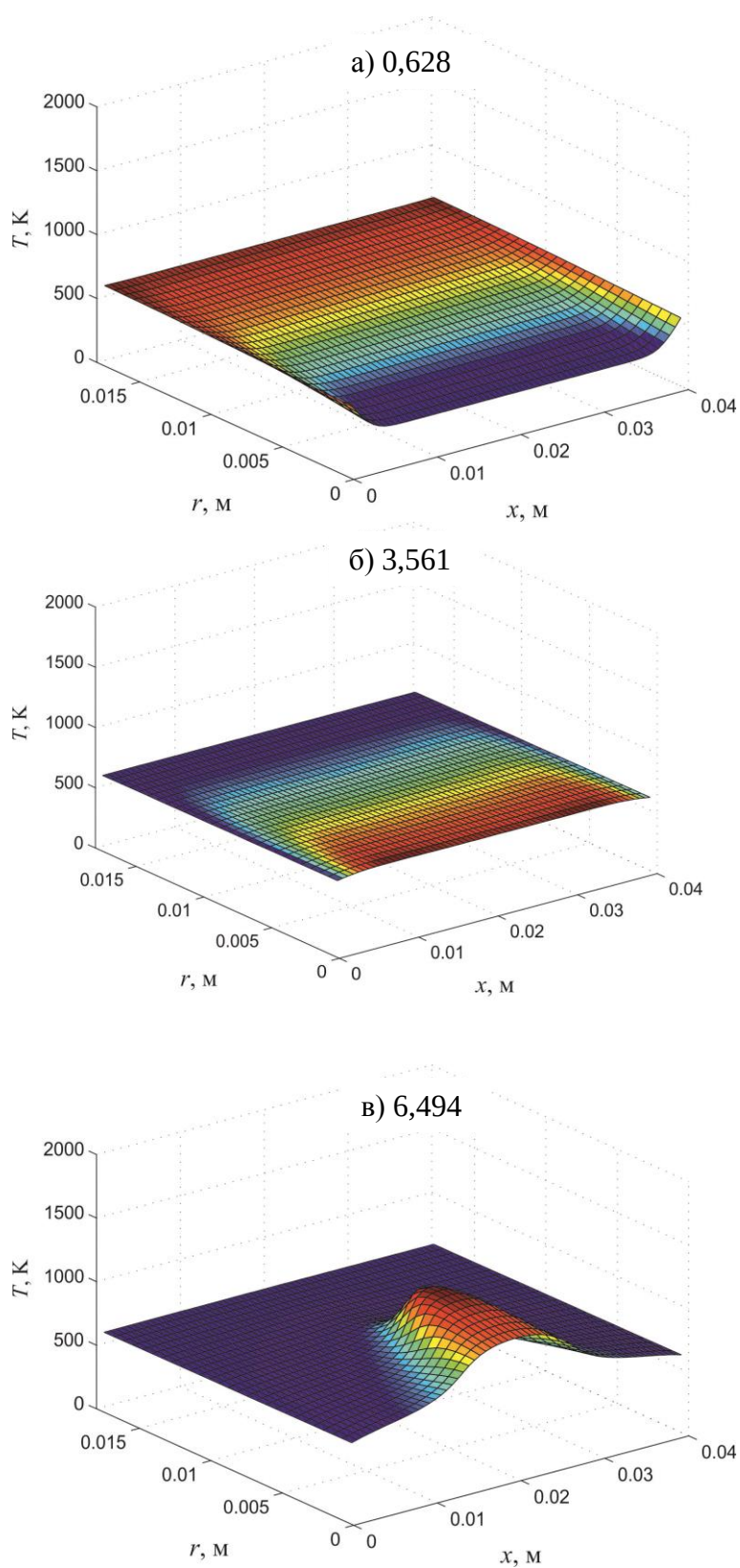


Рисунок 6 – Поля температур внутри реакционного сосуда при самовоспламенении смеси $0,2CH_4 + 0,8Cl_2$

Нагрев смеси начинается у стенок сосуда, а воспламенение смеси происходит в центре сосуда. Таким образом, модель адекватно описывает физическую картину теплового взрыва. При температуре 613 К смесь $0,2\text{CH}_4 + 0,8\text{Cl}_2$ самовоспламеняется (рисунок 7).

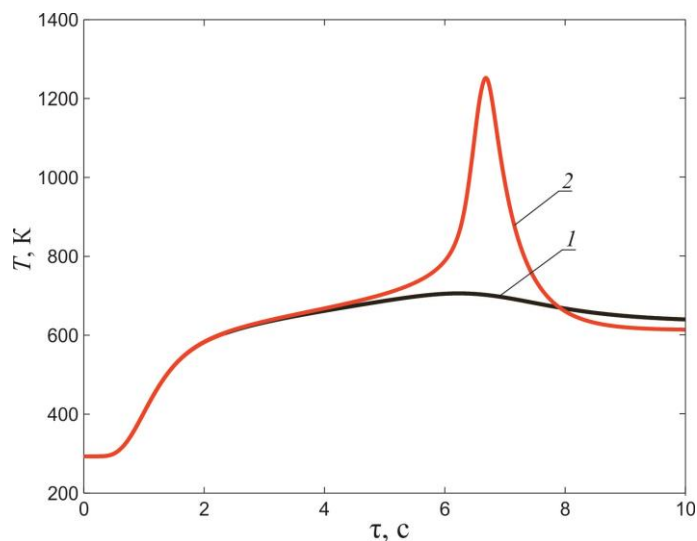


Рисунок 7 – Результаты расчёта изменения температуры смеси $0,20\text{CH}_4 + 0,80\text{Cl}_2$ при температуре стенок реакционного сосуда:
1 – 612 К; 2 – 613 К

Экспериментально установленное значение температуры самовоспламенения для такой смеси составило 591 К, то есть абсолютная погрешность расчёта составила 22 К.

В третьей главе «Исследования по определению скорости распространения фронта пламени в газоздушных смесях» описана серия экспериментов, направленная на рассмотрение вопросов распространения пламени при горении ГВС. Так, например, при расчёте параметров взрыва необходимо учитывать закон изменения СРФП во времени.

В экспериментах использовалась пропановоздушная смесь стехиометрического состава (концентрация горючего 4,5 %(об.)). Взрывы проводились в протяжённой камере длиной 4,12 м, имеющей квадратное сечение со стороной 0,16 м. В первой серии экспериментов камера с открытыми торцами делилась на три части с помощью выдвижных панелей (рисунок 8).

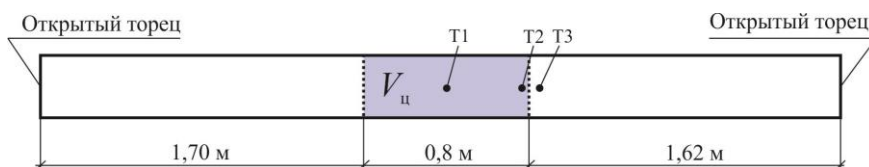


Рисунок 8 – Схема экспериментальной камеры, использовавшейся при проведении первой серии экспериментов

Пропан закачивался в центральную часть объёмом $V_{\text{ц}} = 0,0205 \text{ м}^3$, создавая смесь стехиометрического состава. Смесь зажигали электрическим искровым разрядом в разных точках (T1 – в центре; T2 – на границе смеси;

ТЗ – в точке, расположенной вне облака). В момент зажигания смеси выдвигаемые панели вынимались из камеры.

Во второй серии экспериментов камера делилась на две части. Левый торец камеры открыт, а правый – закрыт. При проведении экспериментов пропановоздушной смесью заполнялась правая часть камеры двух объёмов: $V_{к1} = 0,00064 \text{ м}^3$; $V_{к2} = 0,0128 \text{ м}^3$. Зажигание смеси осуществлялось электрической искрой у закрытого торца камеры в точке Т4 (рисунок 9). В момент зажигания смеси панель, разделяющая камеру, вынималась.

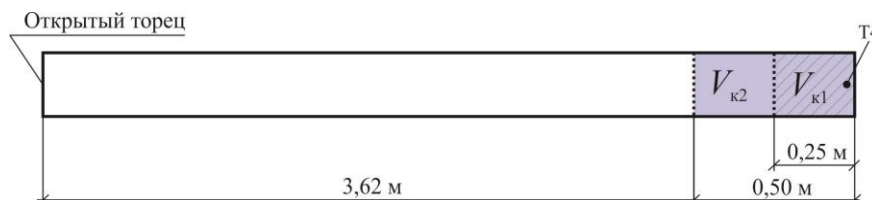


Рисунок 9 – Схема экспериментальной камеры, использовавшейся при второй серии экспериментов

Процесс распространения пламени фиксировался на скоростную видеокамеру (240 кадров/с). На рисунке 10 представлен процесс распространения пламени в первой серии экспериментов при зажигании смеси постоянно искрящим источником в точке ТЗ, расположенной вне облака.

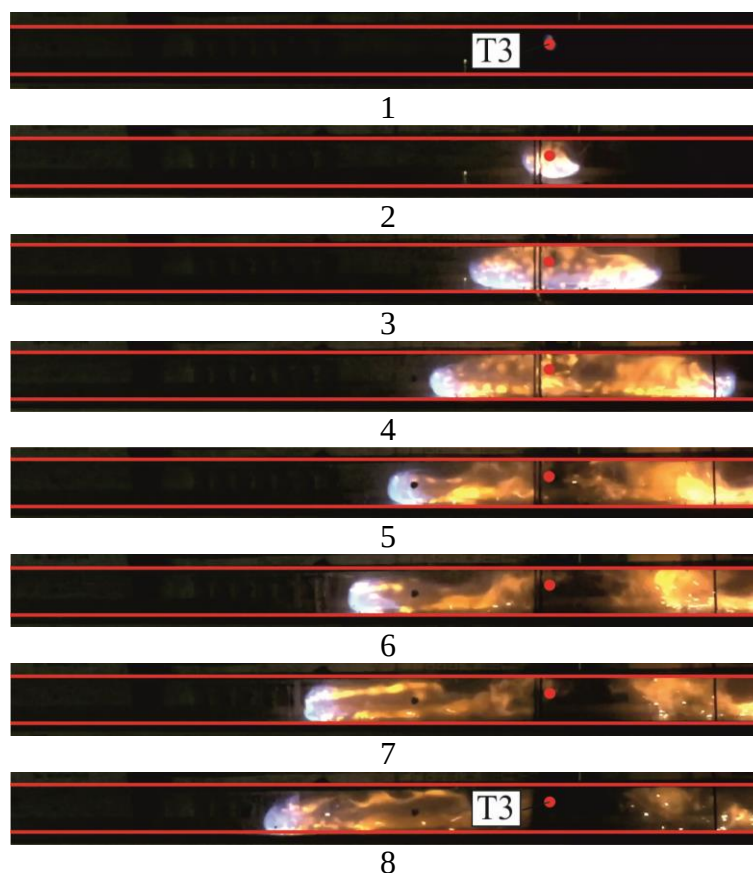


Рисунок 10 – Кадры процесса распространения пламени в камере:

1 – момент воспламенения смеси; 2 – через 54,34 мс после воспламенения смеси;
3 – через 96,14 мс; 4 – через 133,76 мс; 5 – через 175,56 мс; 6 – через 213,18 мс;
7 – через 254,98 мс; 8 – через 292,60 мс

После раскадровки видео строились зависимости изменения СРФП от времени и координаты. На рисунке 11 показаны скоростные характеристики фронта пламени, полученные дифференцированием полиноминой зависимости, описывающей положения фронта пламени во времени.

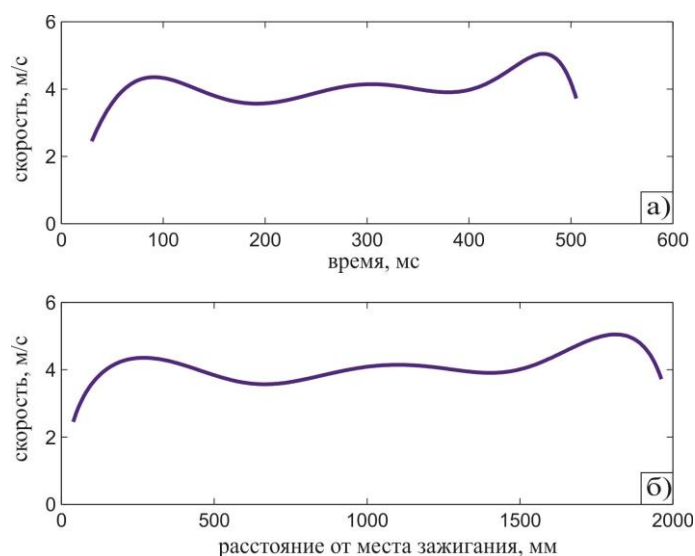


Рисунок 11 – Динамические параметры фронта пламени:
а) зависимость скорости пламени от времени; б) зависимость скорости пламени от координаты

Из полученных данных делали выводы о максимальной СРФП, а также о законе движения фронта пламени (на каком расстоянии фронт пламени ускоряется, движется постоянно, замедляется).

В результате выполненных экспериментов установлено, что при зажигании в центре газового облака (точка Т1) СРФП в два раза больше, чем при его зажигании на границе (точка Т2). При дрейфе газового облака (в первой серии экспериментов точка зажигания Т3 располагалась вне газового облака) или его перемещении в результате диффузии и отсутствии турбулизаторов смеси СРФП почти не ускоряется и движется со средней скоростью $\vartheta_n \varepsilon$ (здесь: ϑ_n – нормальная скорость горения; ε – степень расширения продуктов сгорания). Поэтому дефлаграционный взрыв характерен только скоротечными тепловыми нагрузками. Максимальное расстояние пройденное пламенем составляло не более $R_{пл} = 0,75R_{об}\varepsilon$ (здесь $R_{об}$ – радиус газового облака). Разгон пламени происходит на расстоянии $0,3R_{пл}$. Далее, на протяжении $0,55R_{пл}$, фронт пламени движется с постоянной скоростью (если отсутствуют турбулизаторы и если пламя не автотурбулизируется) и на расстоянии $0,15R_{пл}$ пламя замедляется и перестаёт распространяться.

На основе теории гидродинамики и распространения пламени получена формула для расчёта СРФП. Было принято допущение, что распространение пламени подобно течению жидкости в гладких трубах и коэффициент температуропроводности в газовой смеси пропорционален коэффициенту гидравличе-

ского трения. Тогда турбулентный режим возможен, когда одно из приведённых соотношений больше единицы:

$$\frac{\alpha_T}{\alpha_L} \sim \frac{\lambda_T}{\lambda_L} > 1; \frac{R_p}{R_{кр}} \sim \frac{Re_T}{Re_L} > 1, \quad (2)$$

где α_T и α_L – турбулентный и ламинарный коэффициенты температуропроводности; λ_T и λ_L – турбулентный и ламинарный коэффициенты гидравлического трения; Re_T и Re_L – число Рейнольдса при турбулентном и ламинарном режимах; R_p – длина пути разгона пламени от места воспламенения; $R_{кр}$ – расстояние перехода горения в турбулентный режим.

Для течения жидкостей отношение λ_T / λ_L пропорционально изменению числа Рейнольдса:

$$\frac{\lambda_T}{\lambda_L} \sim \left(\frac{Re_T}{Re_L} \right)^{3/4}. \quad (3)$$

Из соотношений (2) и (3) можно определить турбулентный коэффициент температуропроводности:

$$\alpha_T = \alpha_L \left(\frac{R_p}{R_{кр}} \right)^{\frac{3}{4}}. \quad (4)$$

Скорость распространения пламени по Я.Б. Зельдовичу определяется скоростью передачи тепла и скоростью химической реакции:

$$\vartheta = \sqrt{\frac{\alpha}{\tau}}, \quad (5)$$

где α – коэффициент температуропроводности; $\tau = 1/k$ – характерное время реакции; k – константа скорости химической реакции.

Подставляя (4) в (5) получим формулу для определения СРФП, не возмущённой внешним влиянием:

$$\vartheta_{нв} = \vartheta_n \varepsilon \left(\frac{R_p}{R_{кр}} \right)^{\frac{3}{8}}, \quad (6)$$

где ϑ_n – нормальная скорость горения; ε – степень расширения продуктов сгорания.

Эта формула учитывает физико-химические и газодинамические свойства горючей смеси.

Для определения расстояния, через которое горение перейдет в турбулентный режим ($R_{кр}$), были рассмотрены основные режимы горения (ламинарный, турбулентный, детонационный) и определены числа Рейнольдса для ламинарного (Re_L) и детонационного (Re_D) горения, так как именно для этих режимов хорошо известны параметры горения газовых смесей:

$$Re_{\text{л}} = \frac{\vartheta_{\text{min}} R_{\text{кр}}}{\nu_0}; \quad (7)$$

$$Re_{\text{д}} = \frac{\vartheta_{\text{д}} \Delta}{\nu_{\text{д}}}, \quad (8)$$

где ϑ_{min} – видимая скорость распространения пламени ($\vartheta_{\text{min}} = \vartheta_{\text{н}} \varepsilon$); ν_0 – кинематическая вязкость газовой среды; $\vartheta_{\text{д}}$ – скорость движения продуктов детонации на фронте детонационной волны; Δ – размер (ширина) детонационной ячейки; $\nu_{\text{д}}$ – кинематическая вязкость газовой среды детонации.

Кинематическая вязкость газовой среды в значительной мере зависит от давления и пропорциональна $\sim (P)^{3/2}$, то есть:

$$\nu_{\text{д}} = \nu_0 \left(\frac{P_{\text{изб}}^{\phi}}{P_0} \right)^{3/2}, \quad (9)$$

где $P_{\text{изб}}^{\phi}$ – избыточное давление на фронте детонационной волны; P_0 – атмосферное давление.

Если принять, что в какой-то момент времени значения числа Re в выражениях (7) и (8) становятся равными, то с учётом выражения (9) можно получить формулу для определения критического расстояния, на котором горение переходит в турбулентный режим:

$$R_{\text{кр}} = \frac{\vartheta_{\text{д}} \Delta}{\vartheta_{\text{н}} \varepsilon \left(\frac{P_{\text{взр}}}{P_{\text{атм}}} \right)^{3/2}}. \quad (10)$$

Расчётные значения скорости пламени, полученные по формуле (6), сравнивались со значениями, полученными по методике В.И. Макеева (а), базирующейся на обработке результатов экспериментальных исследований горения водородовоздушной смеси, и по методике Д.З. Хуснутдинова (б), основанной на математическом анализе результатов многочисленных аварийных взрывов ГВС (таблица 3).

Таблица 3 – Сравнение результатов расчёта СРФП

Горючая смесь	Скорость распространения пламени, м/с	
	Существующий метод	Разработанный метод
Водородовоздушная	272 (а)	305
Этиленовоздушная	38,36 (б)	49
Метановоздушная	6,4 (а)	5,8
	11,2 (б)	
Пропановоздушная	15,4 (а)	16,6
	19,1 (б)	

Удовлетворительная сходимость результатов расчётов позволяет сделать вывод о возможности применения формулы (6) для определения СРФП при взрывах ГВС на открытых территориях.

В четвёртой главе «Верификация усовершенствованной методики прогнозирования скорости распространения фронта пламени при сгорании газозооной смеси на основе сравнительного анализа результатов расчёта с последствиями реальных аварийных взрывов». Рассмотрены аварийные взрывы, произошедшие на заводе «Нипро Кемикл Плонт» (Англия, 1974 г.) и в 2010 г. на 2169 км участка газопровода «Нижневартовск–Курган–Куйбышев». По рассматриваемым методам прогнозирования СРФП было выполнено сравнение результатов расчётов с последствиями реальных аварийных взрывов.

Из описания аварии на заводе «Нипро Кемикл Плонт» следует, что в результате разгерметизации трубопровода с циклогексаном в открытом пространстве образовалось облако массой паров 56 т с последующим взрывным горением. По оценкам экспертов, такие последствия могли быть при взрыве 32 т тротила, что эквивалентно 8 т циклогексана. На рисунке 12 показаны зоны разрушений зданий и сооружений на территории завода от взрыва ГВС.

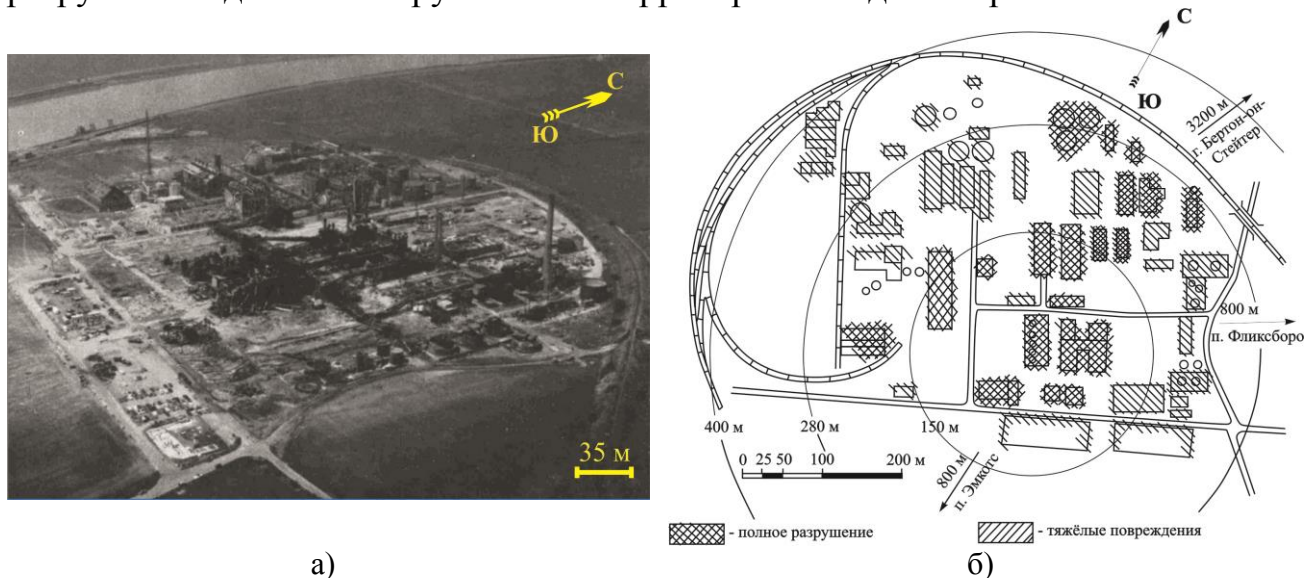


Рисунок 12 – Разрушение зданий и сооружений на заводе «Нипро Кемикл Плонт» от поражающих факторов взрыва облака паров циклогексана:
а) фотография после взрыва (1974 г.); б) план-схема разрушений зданий и сооружений

По исходным данным, полученным экспертами в ходе расследования аварии, были рассчитаны параметры взрыва по методикам, рассматриваемым в первой главе работы. Особое внимание уделялось расчёту СРФП. СРФП, рассчитанную по методикам МЧС и Ростехнадзора, будем именовать вариантом I, по методике Д.З. Хуснутдинова – вариантом II, по разработанной в настоящей работе – вариантом III.

Так, по варианту I СРФП составила 300 м/с, а по вариантам II и III – 277,6 и 174 м/с соответственно. В таблице 4 приведены результаты расчётов избыточного давления и импульса фазы сжатия на различных расстояниях от места взрыва.

Таблица 4 – Сравнение результатов расчётов по трём вариантам

Определяемые величины	Расстояние от центра взрыва, м						
	100	200	300	400	800	1100	3200
$\vartheta_1 = 300$ м/с (Вариант I)							
P_1 , кПа	72,1	29,8	16,1	10,9	5,1	3,9	-
$I_{уд1}$, Па·с	3219,4	1734,2	1202,5	893,0	433,0	312,0	-
$\vartheta_2 = 277,6$ м/с (Вариант II)							
P_2 , кПа	74,8	44,9	31,5	23,8	11,7	8,38	2,61
$I_{уд2}$, Па·с	3250,2	1965,7	1369,9	1039,2	511,2	364,3	114,0
$\vartheta_3 = 174$ м/с (Вариант III)							
P_3 , кПа	29,7	17,9	12,8	9,9	5,1	3,7	1,3
$I_{уд3}$, Па·с	3489,6	2110,1	1498,7	1157,8	599,9	438,5	149,2

Анализ полученных результатов расчётов позволил установить, что во всех вариантах могли иметь место разрушения зданий и сооружений, которые произошли при взрыве. Даже по варианту III, несмотря на то, что рассчитанная скорость пламени существенно меньше, разрушения будут такими же.

Проанализирована другая авария, произошедшая на участке газопровода «Нишневартовск–Курган–Куйбышев». В результате разгерметизации газопровода в открытом пространстве поступило 29,6 т пропана. При достижении облаком источника зажигания произошло взрывное сгорание пропановоздушной смеси. В результате была выжжена значительная часть территории, полностью сгорел автомобиль, а находившиеся в нём люди погибли (рисунок 13). При этом отсутствовали характерные для взрыва признаки – разрушенные или повреждённые здания, сооружения, коммуникации, расположенные вблизи образовавшегося взрывоопасного облака.



Рисунок 13 – Фотография с места аварии после локализации пожара (2010 г.)

Восстановив сценарий аварии согласно рассматриваемым методикам, получили по варианту I скорость распространения пламени 200 м/с, по вариантам II и III – 70,8 и 62,7 м/с соответственно. Параметры взрыва для различных расстояний приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты расчёта параметров взрыва по трём вариантам

Определяемые величины	Расстояние от центра взрыва, м				
	100	200	300	400	1000
$\vartheta_1 = 200$ м/с; (Вариант I)					
P_1 , кПа	35,5	23,7	17,2	13,4	5,2
$I_{уд1}$, Па·с	4756	2335,5	1511	1111,4	425,2
$\vartheta_2 = 70,8$ м/с; (Вариант II)					
P_2 , кПа	6,6	4,1	3,0	2,3	1,0
$I_{уд2}$, Па·с	3334	2072	1494	1165	498
$\vartheta_3 = 62,7$ м/с; (Вариант III)					
P_3 , кПа	5,3	3,2	2,3	1,85	0,8
$I_{уд3}$, Па·с	3071	1897	1370	1072	463

Из приведённых в таблице 5 значений видно, что давление взрыва по варианту I почти в 5–6 раз отличается от вариантов II и III. Дефлаграционный взрыв, рассчитанный по вариантам II и III, сопровождается слабым избыточным давлением и характеризуется только скоротечными тепловыми нагрузками, что как раз и наблюдалось в этой аварии. Если бы сценарий взрыва развивался по варианту I, то имели бы место и разрушения соседних зданий, сооружений.

Анализ рассматриваемых аварий привел к выводу, что предлагаемая методика более реалистично описывает процесс распространения фронта пламени при взрыве газозвдушного облака.

Заключение содержит констатацию основных научных и практических результатов работы. В приложениях представлены акты внедрения результатов диссертационной работы, код программы, а также свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа значений основных параметров взрыва, рассчитанных по методикам, математически описывающим дефлаграционный взрыв, установлено, что они дают схожие результаты при одинаковой СРФП. Основное различие заключается в методе определения СРФП. Для одного и того же сценария взрыва ГВС методики прогнозирования СРФП дают существенно разные значения.

2. Разработана математическая модель фототеплового воспламенения для определения показателей пожаровзрывоопасности газовых смесей, основанная на законах химической кинетики и термодинамики. Верификация данной модели подтверждена экспериментальными исследованиями. Удовлетворительная сходимость результатов расчёта и эксперимента при определении концентрационных пределов воспламенения, минимальной флегматизирующей концентрации и температуры самовоспламенения указывает на широкие возможности и перспективы развития такого метода расчёта показателей пожаровзрывоопасности различных горючих газовых смесей.

3. Теоретически обоснована формула для прогнозирования СРФП с учётом физико-химических и газодинамических свойств газовой среды при взрыве ГВС. Верификация усовершенствованной методики на основе сравнительного анализа с эмпирическими методиками других авторов подтвердила возможность её применения для расчёта СРФП при дефлаграционных взрывах ГВС.

4. По усовершенствованной методике прогнозирования СРФП для аварий, произошедших на заводе «Нипро Кемикл Планта» и на 2169 км участка нефтепровода «Нижевартовск–Курган–Куйбышев», рассчитаны значения СРФП. Полученные результаты показали, что предлагаемая методика удовлетворительно прогнозирует возможную СРФП при взрывах ГВС в открытом пространстве.

5. Для дальнейшего развития методики расчёта СРФП необходимо учесть неравномерность распределения концентрации веществ в ГВС, образующихся при аварийных выбросах, и изменение скорости пламени при преодолении препятствий. Учёт этих обстоятельств позволит повысить точность проводимых расчётов.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

1. Грохотов, М.А. Математическая модель взрывоопасных режимов при фотохлорировании метана [Электронный ресурс] / М.А. Грохотов [и др.] // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 4. – 8 с. – Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-4/06-04-16.ttb.pdf>

2. Грохотов, М.А. Апробация расчётной модели фототеплового воспламенения на экспериментальных данных [Текст] / М.А. Грохотов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2017. – № 7. – С. 75–77

3. Грохотов, М.А. Параметры пожаровзрывоопасности хлорпроизводных метана в смеси с хлором в модели фототеплового воспламенения [Текст] // М.А. Грохотов [и др.] // Пожарная безопасность. – 2017. – № 3. – С. 43–49.

4. Грохотов, М.А. Кинетический подход при расчёте параметров пожаровзрывоопасности газовых смесей метана с хлором [Текст] / М.А. Грохотов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – № 2–3. – С. 27–36. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.27-36.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2016662831. Российская Федерация. Математическая модель фототеплового воспламенения / М.А. Грохотов, И.Р. Бегишев, А.К. Беликов, А.А. Комаров; правообладатели М.А. Грохотов, И.Р. Бегишев, А.К. Беликов, А.А. Комаров; заявл. 03.10.2016; зарегистр. 23.11.2016; опубл. 20.12.2016, Бюл. № 1. – 1 с.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017662988. Российская Федерация. Расчётный метод определения показателей пожаровзрывоопасности газовых смесей / М.А. Грохотов, И.Р. Бегишев, А.К. Беликов, А.А. Комаров; правообладатели М.А. Грохотов,

И.Р. Бегишев, А.К. Беликов, А.А. Комаров; заявл. 04.10.2017; зарегистр. 22.11.2017; опубл. 22.11.2017, Бюл. № 1. – 1 с.

Остальные публикации по теме диссертации:

7. Грохотов, М.А. Разработка математической модели фототеплового воспламенения [Текст] / М.А. Грохотов [и др.] // Материалы 5-й Международной науч.-практ. конф.: Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. – С. 260–261.

8. Грохотов, М.А. Математическая модель фототеплового взрыва [Текст] / М.А. Грохотов [и др.] // Материалы XIX Международной межвуз. науч.-практ. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых: Строительство – формирование среды жизнедеятельности. – М.: НИУ МГСУ, 2016. – С. 266–267.

9. Грохотов, М.А. Критическая интенсивность УФ-света в модели фототеплового воспламенения [Текст] / М.А. Грохотов [и др.] // Материалы 25-й Международной науч.-техн. конф.: Системы безопасности – 2016. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2016 – С. 287–290.

10. Грохотов, М.А. Определение показателей пожаровзрывоопасности в модели фототеплового воспламенения [Текст] / М.А. Грохотов [и др.] // Материалы VI Международной науч.-практ. конф. молодых учёных и специалистов: Проблемы техносферной безопасности. – 2017. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 22–27.

11. Грохотов, М.А. Модель для расчёта показателей пожаровзрывоопасности смесей метана с хлором [Текст] / М.А. Грохотов [и др.] // Материалы XXIX Международной науч.-практ. конф.: Горение и проблемы тушения пожаров. – Балашиха: ВНИИПО, 2017. – Ч. 2. – С. 13–16.

12. Грохотов, М.А. Проблемы обоснования безопасных расстояний на объектах нефтегазовой отрасли [Текст] / М.А. Грохотов [и др.] // Материалы 26-й Международной науч.-техн. конф.: Системы безопасности – 2017. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – С. 277–280.

13. Грохотов, М.А. Расчёт СРФП пламени при дефлаграционном взрыве [Текст] / М.А. Грохотов [и др.] // Материалы 6-й Международной науч.-практ. конф.: Пожаротушение: проблемы, технологии, инновации. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 301–303.

Подписано в печать 10.10.2018. Формат 60х84/1/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 70 экз. Заказ № 558.

Академия ГПС МЧС России. 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4